
Gens, Wolfgang; Köbe, Ulrich :

Transistorteller für Gleichstromantriebe von Elektrofahrzeugen

Zuerst erschienen in:

Elektro-Praktiker : Fachzeitschrift für die Elektrofachkräfte in
Handwerk und Industrie. - Berlin : Huss-Medien GmbH, Verl. Technik,
ISSN 0013-5569, Bd. 42 (1988), 12, S. 377-379

Transistorsteller für Gleichstromantriebe von Elektrofahrzeugen

W. Gens, KDT; U. Köbe; Ilmenau

Batteriegespeiste Elektrofahrzeuge mit Gleichstromfahrantrieb werden vor allem dort eingesetzt, wo freie Beweglichkeit, Abgasfreiheit, Betrieb in geschlossenen Räumen, geringe Lärmbelastung und häufige Anfahrten bei geringen Entfernungen im Vordergrund stehen. Es ist zu erwarten, daß sich im Ergebnis der Entwicklungen auf dem Gebiet der Akkumulortechnik und der Leistungselektronik das Einsatzgebiet für derartige Fahrzeuge erweitern wird.

Im folgenden Beitrag wird die Auslegung von Transistorpulsstellen für Elektrofahrzeuge mit autonomer Energieversorgung aus einem Blei-Akkumulator behandelt. Ausgehend von einer Ersatzschaltung für den Akkumulator werden die Bauelemente des Leistungskreises und der Pulsfrequenz ausgewählt. Unter Verwendung der Ergebnisse der rechnergestützten Simulation wird die Auslegung an zwei Ausführungsbeispielen erläutert.

Die Grundstruktur des Leistungskreises derzeitiger Elektrofahrzeuge besteht aus Akkumulator - Schaltwerk - Gleichstromreihenschlußmotor. Der vorwiegend eingesetzte Pb-Akkumulator ist durch, geringen Wartungsaufwand, großen Betriebstemperaturbereich, hohen Kurzschlußstrom und geringe Zellspannungen gekennzeichnet. Fahrantriebe mit einer Nennleistung bis 10 kW werden häufig mit Gleichspannungen kleiner 100 V gespeist. Demzufolge ist für den Leistungsumsatz ein relativ hoher Gleichstrom erforderlich. Mit Hilfe des kontaktbehafteten mechanischen Schaltwerks in Form von Schützkombinationen und Ankervorwiderständen wird die Geschwindigkeits- und Fahrtrichtungssteuerung realisiert. Diese Schütze werden mit hoher Schalthäufigkeit unter Last betätigt. Dadurch tritt ein intensiver Kontaktverschleiß auf, der eine geringe Betriebszuverlässigkeit sowie einen hohen Wartungsaufwand zur Folge hat.

Der gegenwärtige Entwicklungsstand der Leistungselektronik gestattet es, zur stetigen Veränderung der Ankerspannung einen Transistorpulssteller in das Schaltwerk zu integrieren. Neben dem verringerten Wartungsaufwand ergibt sich eine wesentlich feinfühligere Steuerbarkeit des Fahrzeuges.

1. Schaltungskonzept

Das Schaltungskonzept ist aus den Forderungen an den Fahrbetrieb abzuleiten. Der Fahrmotor muß im motorischen Rechts- und Linkslauf betreibbar sein. Auf die generatorische Widerstands- bzw. Nutzbremsung und die kontaktlose Drehrichtungsumkehr wird unter Berücksichtigung der zusätzlichen Verluste im Stel-

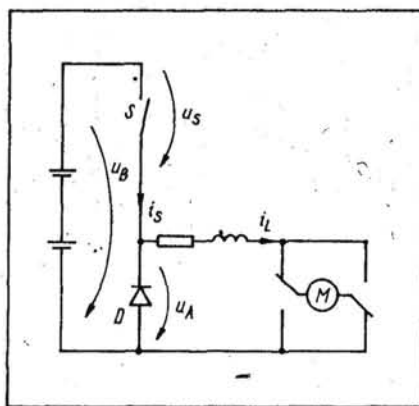


Bild 1. Einquadrantensteller

ler und des Verhältnisses von erforderlichem Aufwand zu erzielbarem Nutzen verzichtet. Demzufolge kommt die einfachste Stellervariante, ein Einquadrantensteller (Bild 1), in Betracht. Als Schalter S wird ein Leistungstransistor eingesetzt. Im Vergleich mit einem Thyristor benötigt er keine Löscheinrichtung, die bei niedrigen Spannungen und großen Strömen sehr aufwendig und verlustbehaftet ist. Die hohe erreichbare Schaltfrequenz erlaubt die Wahl der Pulsfrequenz in einem weiten Bereich. Wie aus Bild 2 hervorgeht, ist der Leistungstransistor während der Einschaltzeit t_e leitend. Der Motorstrom i fließt im Stromkreis, bestehend aus Akkumulator, Leistungstransistor und Fahrmotor. Die Ausgangsspannung des Stellers U_A ist gleich der

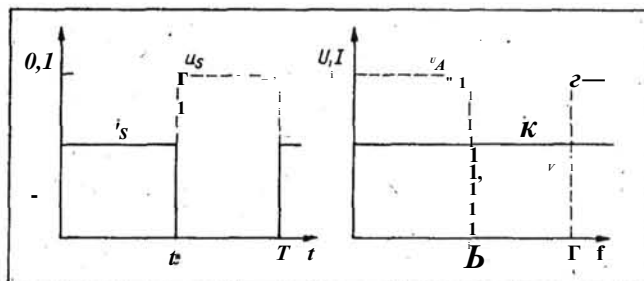


Bild 2. Idealierte Strom- und Spannungsverläufe des Einquadrantenstellers bei vollständig geglättetem Akkumulator- und Motorstrom

Akkumulatorspannung U_B . Während der Ausschaltzeit $t_a = T - t_e$ ist der Leistungstransistor gesperrt, der Motorstrom fließt über die Freilaufdiode D , die Ausgangsspannung U_{ji} ist Null. Mit dem Verhältnis t_e/T kann der Mittelwert der Ausgangsspannung gestellt werden.

2. Spannungszwischenkreis

Der Transistorsteller belastet den Akkumulator mit Impulsströmen, deren Verlauf vom Betriebszustand des Fahrmotors abhängig ist. Das Verhalten des Pb-Akkumulators bei Belastung mit impulsförmigen Strömen kann mit der in Bild 3 dargestellten Ersatzschaltung beschrieben werden. In der Kapazität C_e ist die Antriebsenergie gespeichert. Der Kondensator Q stellt im wesentlichen die Plattenkapazität dar. Die Induktivität L_e ist die wirksame Eigeninduktivität, R_i und R_e sind die Innenwiderstände des Akkumulators. Infolge der praktischen Ausführung der Akkumulatorzuleitung entstehen die Zuleitungsinduktivität L_e und der Zuleitungswiderstand R_e . Die Induktivitäten bewirken eine Begrenzung der Stromänderungsgeschwindigkeit. Zur Begrenzung von Schaltüberspannungen ist es notwendig, einen Zwischenkreis aufzubauen und dessen Spannung mit dem Kondensator C_z abzustützen. Bei Einhaltung der zulässigen Zwischenkreisspannung muß der Kondensator C_z die beim Abschalten des Motorstroms aus der Induktivität $L_e + L_z$ freiwerdende Energie aufnehmen. Die Motorströme sind in der Regel so groß, daß der Kondensator C_z mit Elektrolytkondensatoren realisiert werden muß. Es ist erforderlich, den Kondensator gedämpft aufzuladen, bevor der Steller an den Akkumulator geschaltet werden kann. Die Widerstände R_e , R_z

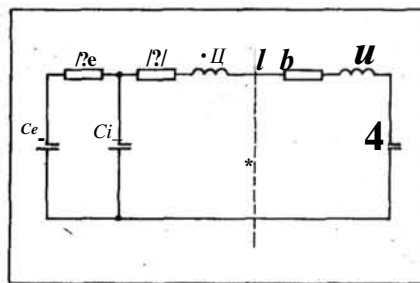


Bild 3. Ersatzschaltbild zur Beschreibung des Pb-Akkumulators und des Zwischenkreises bei Belastung mit Impulsströmen

Prof. Dr. sc. techn. Wolfgang Gens ist Leiter, Dipl.-Ing. Ulrich Köbe Aspirant im Wissenschaftsbereich Steuerungstechnik und Leistungselektronik der Sektion Elektrotechnik an der Technischen Hochschule Ilmenau.

und R_z dämpfen die elektrischen Ausgleichsvorgänge im Zwischenkreis, die durch die impulsförmigen Ströme bei der Pulsung angeregt werden. Zweckmäßigerweise wird das Verfahren der Pulsbreitenmodulation zur Stellung der Ausgangsspannung des Transistorstellers angewendet. Das hat den Vorteil, daß die Frequenzen des Oberschwingungsspektrums der Stellerausgangsspannung sowie des Motor- und Akkumulatorstroms konstant sind. Zur Vermeidung von unzulässigen Schwingungen im Zwischenkreis muß die Pulsfrequenz des Stellers f_p einen ausreichenden Abstand zur Resonanzfrequenz des Zwischenkreises f_z haben. Ist die Pulsfrequenz kleiner als die Resonanzfrequenz, werden Akkumulator, Steller und Motor infolge des stark oberwellenbehafteten Akkumulator- und Motorstroms zusätzlich belastet. Der Steller muß für den Blockierstrom U_B/R_A ausgelegt werden, wobei R_A dem Widerstand im Ankerstromkreis entspricht. Der Kondensator C_x wird jedoch gering belastet. Durch den Einsatz eines Transistorstellers ist es möglich, die Pulsfrequenz größer als die Resonanzfrequenz des Zwischenkreises zu wählen und somit einen gut geglätteten Akkumulator- und Motorstrom zu erhalten. Hierbei ist die Strombelastung des Kondensators C_x sehr hoch. Unter der Annahme eines idealen Transistorstellers und vollständig geglätteten Batterie- und Motorstroms tritt die maximale Strombelastung für den Kondensator C_x bei einem Tastverhältnis

Ч-4/a+0-?л a)

und festgebremstem Fahrmotor auf. Der effektive Kondensatorstrom beträgt in diesem Fall:

$$i_e \approx u - 0,52 S - t y * i. \quad (2)$$

Die entsprechend dem Fahrzyklus im Vergleich zu I_{Cma} geringere, notwendige Strombelastbarkeit des Kondensators C_x läßt sich erforderlichenfalls durch Parallelschaltung mehrerer impulsstromfester Elektrolytkondensatoren erreichen.

Für den Betrieb mit einer hohen Pulsfrequenz sprechen folgende Vorteile:

- Der Akkumulatorstrom ist praktisch vollständig geglättet, der Akkumulator wird maximal ausgenutzt.
- Der Ankerstrom ist praktisch vollständig geglättet, der Fahrmotor wird thermisch und elektrisch minimal belastet, es ist keine zusätzliche Glättungs-drossel erforderlich.
- Der Steller muß nur für den maximal notwendigen arithmetischen Ankerstrommittelwert und nicht für den Blockierstrom ausgelegt werden.
- Die Pulsfrequenz kann erforderlichenfalls außerhalb des Hörbereiches gewählt werden.

3. Transistorsteller

Die Kennwerte der Elemente des Stellers

zur Kennzeichnung ihrer Beanspruchung können zunächst in Abhängigkeit von der Akkumulatorspannung und des erforderlichen Motorstroms abgeschätzt werden. Erstere ist durch den verwendeten Akkumulator fest vorgegeben. Es ist empfehlenswert, den Steller für maximal den doppelten Nennstrom des Fahrmotors ausulegen. Mit Hilfe einer elektronischen Begrenzung kann dafür gesorgt werden, daß dieser Wert auch bei einem Kurzschluß im Motorstromkreis nicht überschritten wird. Diese Möglichkeit besteht jedoch nur bei völliger Glättung des Motorstroms, das heißt bei einer entsprechend hohen Pulsfrequenz. Ansonsten muß der Steller für den Blockierstrom des Antriebsmotors U_B/R_A ausgelegt werden. Dadurch erhöht sich der Aufwand, und es besteht die Gefahr der Überlastung des Antriebsmotors. Mit den ermittelten Beanspruchungen können die Bauelemente des Stellers ausgewählt werden. Zu empfehlen ist der Einsatz empfindlichdrierter Niedervolttransistoren und schneller Niederspannungsdioden. Sie zeichnen sich durch niedrige Flußspannung, sehr gute Schalteigenschaften und die Transistoren zusätzlich durch eine hohe Stromverstärkung aus. Bei erforderlichen Kollektorströmen größer als 20 A hat sich die Parallelschaltung von Leistungstransistoren des Typs KD503 aus der ÖSSR bewährt. Genauere Untersuchungen der harten Parallelschaltung, d. h. ohne zusätzliche verlustbehaftete Symmetrierungswiderstände, haben gezeigt, daß bei entsprechender konstruktiver Anordnung der einzelnen Transistoren die Schalteistung dieser Parallelschaltung mindestens 80% der Summe der Schalteistungen der Einzeltransistoren beträgt.

Für die Freilaufdiode kann ebenfalls eine Parallelschaltung gewählt werden. Auf eine gute thermische Koppelung der parallelgeschalteten Bauelemente ist zu achten.

Ist eine große Anzahl von Leistungstransistorer parallel zu schalten, besteht die Möglichkeit; einzelne Transistorschaltmodule hart bzw. über Drosseln parallel zu schalten. Die Module bestehen aus einer harten Parallelschaltung von 3 bis 5 Leistungstransistoren mit entsprechender Freilaufdiode, Zwischenkreiskondensator und Treiberstufe. Die Stromaufteilung auf die einzelnen Module erfolgt aktiv. Die die Kollektor-Emitterspannung überwachende Treiberstufe schaltet die Leistungstransistoren des Moduls bei Überschreitung seines Maximalstroms ab, so daß der Motorstrom auf die übrigen Module kommutiert, bis diese gegebenenfalls auch den Maximalstrom erreichen. Mit diesem Überlastungsschutz jedes einzelnen Moduls wird neben der aktiven Stromsymmetrierung auch die elektronische Begrenzung des Ausgangsstroms des gesamten Stellers realisiert. Die genauere Berechnung der Beanspruchung

der Stellerelemente sowie die Minimierung der Verlustleistung des Stellers erfolgt zweckmäßig mit Hilfe des in [1] vorgestellten Simulationssystems. Für die Simulation müssen eine Reihe von Parametern der vorausgewählten Bauelemente sowie die parasitären Impedanzen der Verdrahtung bekannt sein. Aus den Berechnungen zur Minimierung der Gesamtverlustleistung des Stellers ergeben sich folgende Anforderungen an die Gestaltung der Verdrahtung und der Transistorbasierteuerung:

- Steiler positiver Basisstromanstieg beim Einschalten des Leistungstransistors ($> 25 \cdot 10^6$ A/s)
- Sättigung des Leistungstransistors während der Einschaltzeit t_i
- Zunächst ein geringer negativer Basisstrom, zum Ausschalten und nach Entsättigung des Leistungstransistors, ein steiler negativer Basisstromanstieg
- Minimale parasitäre Induktivität der Verdrahtung von Zwischenkreiskondensator, Freilaufdiode und Leistungstransistor.

Diese Forderungen können durch die Modulbauweise besonders gut erfüllt werden. Diese ermöglicht vor allem die Minimierung der parasitären Induktivität. Dadurch werden die Schaltverluste klein und es treten nur geringe Schaltüberspannungen auf, so daß auf verlustbehaftete Schutzbeschaltungen verzichtet werden kann. Besonderes Augenmerk ist den Durchlaßverlusten zu schenken. Sie stellen die hauptsächlichsten Verluste bei optimiertem Schaltverhalten des Transistor-Schalters dar. Ein Einfachtransistor ist, daher günstiger als eine Darlingtonschaltung. Vor Austausch einer Darlington-Schaltung gegen einen Einfachtransistor ist zu untersuchen, ob in der Gesamtbilanz die Verlustleistung gesenkt wird. Zum einen muß bei einem Einfachtransistor ein größerer Basisstrom von der Treiberstufe bereitgestellt werden, der einer verlustbehafteten Stromversorgung entnommen wird, zum anderen muß durch besondere schaltungstechnische Maßnahmen die Änderungsgeschwindigkeit des Basisstroms zur Einhaltung der Schaltverluste mindestens um den Faktor 10 erhöht werden.

4. Ergebnisse

In einem Gabelstapler mit einer Akkumulatornennspannung von 24 V wurden zwei Transistorsteller für maximale Motorströme von 200 A und 300 A erprobt. Der 200-A-Steller (Bild 4) ist mit einer Darlingtontransistorschaltung und einer Treiberstufe realisiert. Die parallel geschalteten Leistungstransistoren sind kreisförmig um den Treibertransistor angeordnet. Die Verdrahtung erfolgte sternförmig. Auf Grund der räumlichen Ausdehnung und der daraus resultierenden großen parasitären Induktivität ist eine

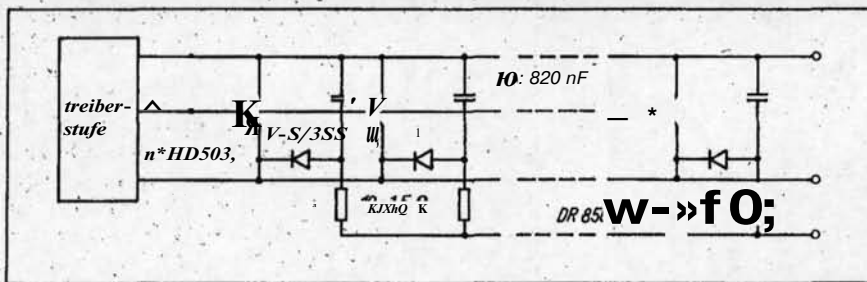


Bild 4. Transistorsteifer mit Parallelschaltung von Leistungstransistoren und gemeinsamer Freilaufdiode sowie gemeinsamem Zwischenkreiskondensator

zusätzliche Überspannungsbegrenzung erforderlich. Die Messungen ergaben bei einer Pulsfrequenz von 10 kHz und einem Motorstrom von 200 A eine Gesamtverlustleistung von 660 W. Dieser Steller zeichnet sich durch einen geringen Aufwand für die Treiberstufe aus. Zur Verbesserung des Wirkungsgrades und zur Senkung der Verlustleistung des Leistungstransistors wurde der 300-A-Steller in Modulbauweise mit einem Einfachtransistor entsprechend Bild 5 realisiert. Es wurden 4 Module mit einem maximalen Ausgangsstrom von je 80 A parallelgeschaltet. Die parasitäre Induktivität eines Moduls ist kleiner als 25 nH. Durch einen steilen Basisstromanstieg wird ein Kollektorstromanstieg von $250 \cdot 10^{-6} \text{ A/s}$ und eine Fallzeit von $0,3 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ erreicht. Der Durchlaßspannungsabfall der Leistungstransistoren beträgt bei Maximalstrom 0,75 V. Die Gesamtverluste konnten dadurch bei einer Pulsfrequenz von 10 kHz und einem Motorstrom von 200 A auf 300 W gesenkt werden. Bei voller Ausnutzung der Spannungsfestigkeit des Leistungstransistors kann der Transistorsteller an einer Akkumulatormennspannung von 60 V betrieben werden, wobei sich die Ausgangsleistung entsprechend erhöht. Infolge des Einsatzes des Transistorstellers entfallen einige Schütze der Gabelstaplersteuerung, und der Verschleiß der verbleibenden wird wesentlich herabgesetzt. Mit Hilfe der stetigen Stellung der Ankerspannung des Fahrmotors wurde eine bedeutende Verbesserung des Fahrverhaltens erreicht. Das zeigt sich besonders bei Fahrten in engen Räumen sowie beim Positionieren des Fahrzeugs. Es erscheint möglich, den Steller auch für die Speisung der Hydraulikpumpe zu nutzen, so daß die Drosselklappen im Ölkreislauf entfallen und der Akkumulator noch besser ausgenutzt wird.

5. Zusammenfassung

Zur Steuerung der Antriebsleistung von batteriegespeisten Fahrzeugen werden auch in Zukunft, besonders im Bereich kleiner Batteriespannungen, Parallelschaltungen von Leistungsbauelementen erforderlich sein. Durch den Vergleich von zwei Varianten der Parallelschaltung von Leistungstransistoren konnte nachge-

wiesen werden, daß die Parallelschaltung kompletter Module, bestehend aus einem oder mehreren parallel geschalteten Leistungstransistoren, einer Freilaufdiode und einem Zwischenkreiskondensator, hinsichtlich der Schaltverluste bei Einhaltung des sicheren Arbeitsbereiches der Leistungstransistoren günstiger ist als die

Parallelschaltung von einzelnen Leistungstransistoren. Mit Hilfe der rechnergestützten Simulation können die Bauelementebeanspruchungen berechnet und erforderliche Schutzbeschaltungen ausgelegt werden. Die Schaltungsunterlagen für die Transistorsteller können von der Technischen Hochschule Ilmenau, Sektion Elektrotechnik zur Nachnutzung zur Verfügung gestellt werden.

Literatur

- [1] Petzold, J.: Rechnergestützte Auslegung leistungselektronischer Stellglieder auf Transistorbasis. 31. Internationales wissenschaftliches Kolloquium. 27.-31.10.1986, Heft 2, Technische Hochschule Ilmenau.

EP 6309

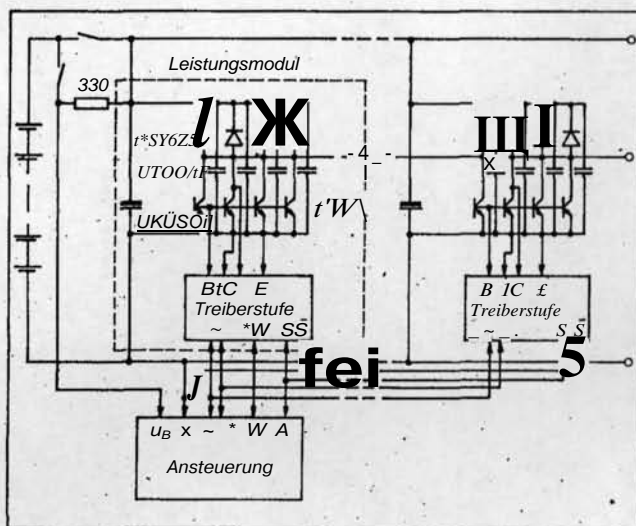


Bild 5. Transistorsteller mit Parallelschaltung von Leistungsmodulen